比较研究固态发酵菜籽粕和菜籽粕对生长肉兔的营养价值

田　刚[1]　王乐成[1*]　余　冰[1]　陈　航[1]　罗玉衡[1]　陈代文[1]　刘书亮[2]

（1.四川农业大学动物营养研究所动物抗病营养教育部重点实验室，成都 611130；2.四川农业大学食品学院，雅安 625014）

摘　要：本研究旨在通过消化试验比较固态发酵菜籽粕（SFRSM）与菜籽粕（RSM）在生长肉兔上的营养价值，为家兔饲料原料数据库提供基础数据。在测定 SFRSM 和 RSM 化学成分的基础上，将 36 只 42 日龄、遗传背景相同的健康法国伊拉商品兔按体重相近原则随机分为 3 组（12 只/组），饲养于粪尿可分开的代谢笼中，每笼 1 只，分别饲喂 1 种基础饲粮和 2 种试验饲粮（85%基础饲粮+15% SFRSM 或 RSM），进行体内消化试验。试验期 11 d（预试期 7 d，收集期 4 d）。结果显示：1）与 RSM 比，SFRSM 的粗纤维（CF）、无氮浸出物（NFE）、酸性洗涤纤维（ADF）和异硫氰酸酯（ITC）含量显著降低（$P<0.01$），其他常规营养成分[除中性洗涤纤维（NDF）外]和小肽含量显著升高（$P<0.05$ 或 $P<0.01$）；各氨基酸含量不同程度提高，其中精氨酸（Arg）、天冬氨酸（Asp）、谷氨酸（Glu）、组氨酸（His）、异亮氨酸（Ile）、苯丙氨酸（Phe）、脯氨酸（Pro）和丝氨酸（Ser）含量达极显著水平（$P<0.01$）。2）与 RSM 相比，SFRSM 的消化能（DE）值（14.97 MJ/kg DM）提高了 34.3%（$P<0.01$）；总能（GE）、粗蛋白质（CP）、ADF、NDF、钙（Ca）和磷（P）全肠表观消化率也有所提高（$P>0.05$）；各氨基酸全肠表观消化率不同程度提高，其中 Asp、半胱氨酸（Cys）、甘氨酸（Gly）、Ile、酪氨酸（Tyr）和缬氨酸（Val）全肠表观消化率达显著或极显著水平（$P<0.05$ 或 $P<0.01$）。结果表明，总体而言，SFRSM 对生长肉兔的营养价值高于 RSM。

关键词：固态发酵菜籽粕；菜籽粕；生长肉兔；化学成分；全肠表观消化率

中图分类号：S816　　　　文献标识码：A　　　　　文章编号：

蛋白质是家兔饲粮的重要组成部分，一般由豆粕提供[1]。然而，随着蛋白质饲料资源短缺问题日益突出及豆粕等优质蛋白质饲料价格持续上涨，严重制约了我国包括家兔在内的养殖业的健康、可持续发展[2]。因此，研发新的蛋白质饲料并评价其营养价值，具有重要的现

收稿日期：2016-08-24

基金项目：四川省科技支撑项目（2016NZ002，2012NZ0005）；四川农业大学“双支计划”项目

作者简介：田　刚（1974-），男，重庆黔江人，副教授，博士，主要从事家兔营养与饲料高效利用研究。

E-mail: tgang2008@126.com

*同等贡献作者

实意义和广阔的应用前景。菜籽粕（rapeseed meal，RSM）是世界第二大产量的蛋白质饼粕[3]，我国年产量约 700 万 t[4]。虽然 RSM 的蛋白质含量高、氨基酸组成较平衡，但含有多种抗营养因子包括硫代葡萄糖苷（glucosinolates，GS）及其降解产物[如异硫氰酸酯（ITC）、噁唑烷硫酮（OZT）和腈类等]、α-半乳糖苷、植酸、酚类化合物（如单宁）等，这限制了其在非反刍动物饲粮中的应用[5-7]。因此，国内外已采用了多种技术来改善 RSM 的营养和饲用价值，其中固态发酵技术优势明显[8]。RSM 经合适的微生物固态发酵后，得到的产品被称为固态发酵菜籽粕（solid-state fermented rapeseed meal，SFRSM）。目前国内外已有不少关于 SFRSM 和 RSM 化学组成的报道，且比较一致的结果是，SFRSM 较之 RSM，其粗蛋白质（CP）、小肽（small peptide，SP）、游离氨基酸（FAA）等有益成分的含量或/和种类大幅增加，抗营养因子含量或/和种类、纤维含量则明显降低[9-20]。然而，关于 SFRSM 和 RSM 的营养物质消化利用情况的比较研究报道却很少，且仅限于体外[10,15-16,18]、大鼠[9]、猪[13,21-22]和鸡[14,19]上，在家兔上尚未见报道。因此，本试验旨在分析 SFRSM 和 RSM 化学组成的基础上，以生长肉兔为模型，测定并比较 2 种原料的营养物质全肠表观消化率和消化能（DE）值，为家兔饲料原料数据库补充数据，并为 SFRSM 在家兔生产上的应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验设计

消化试验采用单因子试验设计，用顶替法测定总能（GE）和营养物质全肠表观消化率。将 36 只 42 日龄、遗传背景相同的健康法国伊拉商品兔按体重相近原则随机分为 3 组，每组 12 只。试验动物饲养于粪尿可分离的代谢笼（60 cm×60 cm×45 cm）中，每笼 1 只，分别饲喂 3 种不同的饲粮（1 种基础饲粮和 2 种试验饲粮）。

1.2 试验饲粮

基础饲粮按 De Blas 等[1]推荐的生长兔营养需要配制，其组成及营养水平见表 1。2 种试验饲粮分别由 85%基础饲粮+15%RSM 或 SFRSM 混合而成。饲粮均制成直径为 3.0 mm 的颗粒料。

RSM 为普通 RSM，购自四川绵阳游仙粮油购销公司。SFRSM 是以 RSM 为底物，按田刚等[23]的方法固态发酵制备，发酵菌种为戊糖片球菌（*Pediococcus pentosaceus*，ATCC33316）、季也蒙假丝酵母菌（*Candida guilliermondii*，ATCC6260）和紫红红球菌

（*Rhodococcus rhodochrous*，ATCC13808）。

表 1　基础饲粮组成及营养水平（干物质基础）

Table 1　Composition and nutrient levels of the basal diet (DM basis) %

原料 Ingredients	含量 Content	营养水平 Nutrition levels[2)]	含量 Content
玉米 Corn	21.70	消化能 DE/(MJ/kg)	11.53
苜蓿草粉 Alfalfa meal	14.00	粗蛋白质 CP	17.91
豆粕 Soybean meal	14.00	粗纤维 CF	17.42
小麦麸 Wheat bran	29.00	酸性洗涤纤维 ADF	21.47
花生壳 Peanut hull	16.00	中性洗涤纤维 NDF	37.02
大豆油 Soybean oil	2.00	赖氨酸 Lys	0.90
磷酸氢钙 $CaHPO_4$	0.40	蛋氨酸+半胱氨酸 Met+Cys	0.67
石粉 Limestone	1.50	钙 Ca	1.14
食盐 NaCl	0.40	总磷 TP	0.66
预混料 Premix[1)]	1.00		
合计	100.00		

[1)] 预混料为每千克饲粮提供 The premix provided the following per kilogram of the diet: VA 8000 IU，VB_2 3 mg，VB_5 15 mg，VD_3 1000 IU，VE 20 IU，VK_3 2.4 mg，Cu 10 mg，Fe 50 mg，Mn 10 mg，Zn 60 mg，I 0.50 mg，Se 0.05 mg，Co 0.25 mg，Met 0.8 g。

[2)] 计算值 Calculated values。

1.3　饲养管理

消化试验在四川农业大学动物营养研究所科研基地进行，参照 Perez 等[24]的方法执行，即试验期 11 d（预试期 7 d，收集期 4 d）。试验开始之前用甲醛和高锰酸钾（2:1）对兔舍熏蒸消毒 7 d。预试期开始各组饲喂对应的饲粮，日喂 2 次（09:00 和 18:00），自由采食和饮水，并仔细观察动物的采食和健康情况。收集期开始每日准确称重各组试兔的饲料量，并结算余料和损失料（因家兔有刨料的习惯）；次日 08:00 开始收集各组试兔的全部粪样并称重，连续收集 4 d。舍内温度（17.0±0.8）℃，相对湿度（68.25±5.78）%，自然采光和通风。

1.4　检测指标与方法

1.4.1 样品采集与化学成分分析

鲜粪除去兔毛后，喷洒 10%盐酸固氮，-18 ℃封装保存；试验结束时，将各试兔 4 d 的粪样混匀并称重，65 ℃烘干、称重，-18 ℃封装保存备用。SFRSM、RSM、基础饲粮、试验饲粮和干粪样均按张丽英[25]的方法进行化学成分分析。所有样品均粉碎过 40 目筛，然后采样四分法取样。GE、干物质（DM）、CP、粗纤维（CF）、酸性洗涤纤维（ADF）、中性洗涤纤维（NDF）、无氮浸出物（NFE）、粗脂肪（EE）、粗灰分（Ash）、钙（Ca）、总磷（TP）、氨基酸（AA）、SP、ITC 等的含量均在四川农业大学动物营养研究所实验室测定。

1.4.2 计算公式

按下列公式计算 SFRSM 和 RSM 的营养物质（包括 GE）全肠表观消化率[26]：

$$\text{待测原料营养物质全肠表观消化率（\%）}=（DT\text{-}DB）/F+DB；$$

$$F=C_1\times f/[C_1\times f+C_0(1\text{-}f)]。$$

式中：DB 和 DT 分别表示基础饲粮与试验饲粮营养物质全肠表观消化率；F 为试验饲粮营养物质中待测原料营养物质所占的比例；f 为试验饲粮中掺入待测原料的比例；C_0 为基础饲粮中该营养物质的含量；C_1 为待测原料中该营养物质的含量。

1.5 数据处理与统计分析

数据经 Excel 2007 处理后，用 SAS 8.0 统计软件进行独立样本 t 检验。结果以平均值±标准差表示，P<0.05 表示差异显著，P<0.01 表示差异极显著。

2 结 果

2.1 SFRSM 与 RSM 的营养物质和 ITC 含量比较

由表 2 可知，SFRSM 的 CF、ADF、NFE 和 ITC 含量极显著低于 RSM（P<0.01），分别低 8.7%、8.2%、38.5%和 84.3%；而其他常规营养物质（除 NDF 外）含量均显著或极显著高于 RSM（P<0.05 或 P<0.01），其中 GE、CP、SP、EE 和 Ash 分别高 15.6%、26.6%、54.1%、22.2%和 27.1%。

表 2 SFRSM 和 RSM 的主要营养物质和 ITC 含量（干物质基础）

Table 2 The contents of major nutrients and ITC in SFRSM and RSM (DM basis) %

项目 Items	基础饲粮 Basal diet	菜籽粕饲粮 RSM diet	固态发酵菜籽粕饲粮	菜籽粕 RSM	固态发酵菜籽粕 SFRSM	P 值 P-value*

			SFRSM diet			
干物质 DM	87.71±1.23	86.20±1.40	90.83±0.29	92.04±0.02	92.99±0.03	<0.001
总能 GE/(MJ/kg DM)	17.53±0.45	17.52±0.74	18.14±0.65	18.87±0.09	21.82±0.12	<0.001
粗蛋白质 CP	17.07±0.55	18.72±1.53	19.53±1.23	37.90±0.33	47.99±0.34	<0.001
粗脂肪 EE	5.44±0.37	5.32±0.46	5.07±0.46	2.52±0.04	3.08±0.06	<0.001
粗纤维 CF	16.59±0.76	16.93±1.88	16.78±1.99	13.87±0.19	12.67±0.19	0.002
酸性洗涤纤维 ADF	20.95±2.27	20.74±2.55	20.68±2.44	23.16±0.51	21.27±0.45	0.009
中性洗涤纤维 NDF	37.64±2.38	37.81±2.41	37.95±2.30	36.91±0.48	37.48±0.52	0.137
无氮浸出物 NFE	39.59±1.79	36.13±2.35	39.68±1.33	28.58±0.30	17.59±0.56	<0.001
粗灰分 Ash	9.02±0.73	9.11±0.86	9.77±0.74	9.18±0.09	11.67±0.19	<0.001
钙 Ca	1.53±0.17	1.41±0.20	1.50±0.13	0.48±0.01	0.50±0.01	0.028
总磷 TP	0.57±0.11	0.64±0.11	0.70±0.11	1.17±0.02	1.29±0.03	0.002
小肽 SP				4.38±0.05	6.75±0.09	<0.001
异硫氰酸酯 ITC/(mg/kg)				3 556.59±113.78	557.27±86.00	<0.001

* *P* 值表示菜籽粕与固态发酵菜籽粕之间的比较。下表同。*P*-value represented the comparison between RSM and SFRSM. The same as below.

由表 3 可见，SFRSM 的总氨基酸含量较 RSM 高 11.9%（$P>0.05$），各种氨基酸含量也不同程度地高于 RSM，尤其是精氨酸（Arg）、天冬氨酸（Asp）、谷氨酸（Glu）、组氨酸（His）、异亮氨酸（Ile）、苯丙氨酸（Phe）、脯氨酸（Pro）和丝氨酸（Ser），差异达到极显著水平（$P<0.01$）。

表 3 SFRSM 和 RSM 的氨基酸含量（干物质基础）

Table 3 Amino acid contents of SFRSM and RSM (DM basis) %

项目 Items	基础饲粮 Basal diet	菜籽粕饲粮 RSM diet	固态发酵菜籽粕饲粮 SFRSM diet	菜籽粕 RSM	固态发酵菜籽粕 SFRSM	*P* 值 *P*-value
必需氨基酸 EAA						
精氨酸 Arg	1.11±0.19	1.18±0.17	1.32±0.17	2.48±0.06	2.92±0.08	0.002

组氨酸 His	0.45±0.08	0.49±0.12	0.56±0.14	1.12±0.11	1.56±0.11	0.007
异亮氨酸 Ile	0.64±0.08	0.58±0.08	0.82±0.14	1.46±0.10	1.86±0.11	0.009
亮氨酸 Leu	1.30±0.23	1.30±0.16	1.59±0.14	2.48±0.06	2.61±0.10	0.150
赖氨酸 Lys	0.78±0.12	0.83±0.11	0.99±0.21	2.63±0.08	2.76±0.04	0.072
蛋氨酸 Met	0.26±0.11	0.28±0.99	0.35±0.95	0.56±0.07	0.68±0.05	0.061
苯丙氨酸 Phe	0.84±0.11	0.88±0.13	1.04±0.22	1.38±0.07	1.62±0.06	0.009
苏氨酸 Thr	0.72±0.12	0.76±0.13	0.95±0.22	1.65±0.12	1.74±0.10	0.359
缬氨酸 Val	0.75±0.14	0.74±0.15	0.99±0.17	1.92±0.06	1.98±0.07	0.321
非必需氨基酸 NEAA						
丙氨酸 Ala	0.75±0.12	0.75±0.18	0.89±0.14	1.59±0.07	1.68±0.06	0.158
天冬氨酸 Asp	1.53±0.17	1.58±0.19	1.88±0.24	2.67±0.05	2.96±0.07	0.004
半胱氨酸 Cys	0.28±0.09	0.30±0.10	0.38±0.11	0.57±0.08	0.60±0.07	0.652
谷氨酸 Glu	3.42±0.58	3.76±0.42	4.5±0.61	6.93±0.13	7.68±0.07	0.001
甘氨酸 Gly	0.90±0.22	0.96±0.20	1.17±0.20	1.96±0.10	2.01±0.04	0.489
脯氨酸 Pro	2.85±0.59	3.05±0.50	3.65±0.35	1.82±0.06	2.28±0.04	<0.001
丝氨酸 Ser	0.88±0.18	0.94±0.24	1.11±0.12	1.50±0.05	1.75±0.08	0.009
酪氨酸 Tyr	0.57±0.14	0.55±0.11	0.71±0.19	1.11±0.06	1.14±0.05	0.453
总氨基酸 TAA	18.04±3.24	18.95±3.06	22.94±3.44	33.83±1.27	37.85±1.60	0.027

2.2 SFRSM 与 RSM 对生长肉兔的营养物质全肠表观消化率及 DE 值比较

由表 4 可知，FSRSM 的 DE 值较 RSM 高 34.3%（P<0.01），而 GE 和常规营养物质全肠表观消化率两者间无显著差异（P>0.05），但 FSRSM 的 DM、GE、CP、ADF、NDF、Ca 和 TP 全肠表观消化率较 RSM 略有提高。

表 4 SFRSM 和 RSM 对生长肉兔的主要营养物质全肠表观消化率及 DE 值（干物质基础）

Table 4 Apparent total tract digestibility of major nutrients and DE value in SFRSM and RSM for growing rabbits (DM basis)

项目 Items	基础饲粮 Basal diet	菜籽粕饲粮 RSM diet	固态发酵菜籽粕饲粮	菜籽粕 RSM	固态发酵菜籽粕	*P* 值 *P*-valu

			SFRSM diet		SFRSM	e
消化能值 DE value/(MJ/kg DM)	11.83±0.25	11.72±0.15	12.30±0.21	11.15±1.02	14.97±1.40	<0.001
全肠表观消化率 Apparent total tract digestibility/%						
干物质 DM	67.63±3.02	66.81±3.39	65.97±2.82	62.38±21.71	57.14±17.91	0.562
总能 GE	67.44±1.45	66.91±0.88	67.78±1.16	63.91±5.86	69.40±6.85	0.069
粗蛋白质 CP	74.63±2.26	73.82±2.49	74.17±1.31	71.56±9.48	73.19±4.12	0.618
粗纤维 CF	22.88±0.97	23.95±1.11	24.51±1.37	17.69±15.96	16.86±18.97	0.917
酸性洗涤纤维 ADF	25.23±7.05	25.54±5.25	25.62±7.29	26.74±38.20	27.30±25.53	0.972
中性洗涤纤维 NDF	24.78±4.64	24.90±6.42	25.09±5.50	25.22±24.79	25.93±20.74	0.947
粗脂肪 EE	87.72±2.57	88.18±2.75	88.13±2.20	93.72±36.11	92.21±23.97	0.908
粗灰分 Ash	62.20±4.15	61.45±2.13	60.91±1.54	56.99±14.91	54.88±8.77	0.703
无氮浸出物 NFE	71.93±2.31	70.89±1.99	72.28±2.40	70.07±18.00	62.76±47.78	0.658
钙 Ca	57.47±4.07	58.59±2.84	58.75±1.53	79.14±55.14	81.15±28.37	0.912
总磷 TP	29.44±6.70	29.19±6.11	30.03±5.72	28.46±24.68	31.59±20.79	0.759

由表 5 可知，SFRSM 的总氨基酸和各氨基酸[除赖氨酸（Lys）外]全肠表观消化率均不同程度地高于 RSM，尤其是 Asp、半胱氨酸（Cys）、甘氨酸（Gly）、Ile、酪氨酸（Tyr）和缬氨酸（Val），差异达到显著或极显著水平（$P<0.05$ 或 $P<0.01$）。

表 5　SFRSM 和 RSM 对生长肉兔的氨基酸全肠表观消化率（干物质基础）

Table 5　Apparent total tract digestibility of amino acids in SFRSM and RSM for growing rabbits (DM basis) %

项目 Items	基础饲粮 Basal diet	菜籽粕饲粮 RSM diet	固态发酵菜籽粕饲粮 SFRSM diet	菜籽粕 RSM	固态发酵菜籽粕 SFRSM	*P* 值 *P*-value
必需氨基酸 EAA						
精氨酸 Arg	88.62±1.09	87.76±0.95	87.89±1.60	85.58±3.37	86.33±5.05	0.699
组氨酸 His	83.62±1.75	81.88±1.81	81.70±2.07	77.93±5.91	78.58±5.42	0.800

异亮氨酸 Ile	75.14±2.93	69.31±2.57	75.42±3.47	54.86±8.96	75.97±10.24	<0.001
亮氨酸 Leu	80.33±2.20	78.65±1.86	80.17±2.94	73.68±7.34	79.72±11.21	0.171
赖氨酸 Lys	81.32±1.68	77.35±1.96	76.78±3.00	70.66±5.25	69.51±7.80	0.704
蛋氨酸 Met	58.55±6.67	59.83±8.00	64.65±2.95	63.24±29.24	77.86±9.33	0.149
苯丙氨酸 Phe	81.31±2.20	80.02±1.79	80.79±2.58	75.57±7.97	79.29±10.17	0.374
苏氨酸 Thr	66.02±4.29	71.76±2.72	73.81±2.45	86.04±9.50	92.14±8.21	0.142
缬氨酸 Val	78.01±2.45	74.48±1.82	78.58±3.27	66.66±5.86	79.81±10.27	0.002
非必需氨基酸 NEAA						
丙氨酸 Ala	70.19±4.27	74.53±2.71	75.78±2.39	86.05±9.91	89.82±8.40	0.369
天冬氨酸 Asp	77.00±2.84	75.94±2.40	78.72±2.88	72.51±10.17	83.76±11.32	0.031
半胱氨酸 Cys	86.75±2.40	85.67±2.04	88.37±2.32	82.69±7.76	92.57±8.35	0.010
谷氨酸 Glu	82.99±1.93	86.54±1.21	87.44±1.09	96.45±4.60	98.66±3.83	0.260
甘氨酸 Gly	74.31±1.85	76.33±1.63	78.51±1.45	81.54±5.85	89.12±5.11	0.006
脯氨酸 Pro	85.93±1.38	85.33±1.33	86.53±1.60	80.05±13.16	90.79±12.91	0.082
丝氨酸 Ser	74.90±2.77	79.03±1.97	79.82±1.77	92.98±8.61	94.08±6.89	0.756
酪氨酸 Tyr	76.97±2.88	72.75±2.91	76.93±3.09	60.42±11.41	76.81±11.89	0.005
总氨基酸 TAA	80.91±1.91	79.73±1.81	81.51±2.36	76.15±7.28	83.14±8.72	0.067

3 讨 论

3.1 SFRSM 与 RSM 的营养物质和 ITC 含量比较

化学组成可粗略地反映饲料的营养价值。本试验发现，较之 RSM，SFRSM 的 ITC、CF、ADF 和 NFE 含量显著降低，GE、CP、SP、EE、Ash、总氨基酸、Arg、Asp、Glu、His、Ile、Phe、Pro 和 Ser 含量显著提高，达到我国低 ITC 饲用 RSM 的国家标准[27]，表明 SFRSM 的营养价值较 RSM 有所提高。本试验中的 SFRSM 由季也蒙假丝酵母、戊糖片球菌和紫红红球菌混菌固态发酵制得，其与 RSM 的化学成分差异与有关酵母、乳酸菌等混菌固态发酵制得的 SFRSM 的多数报道[14-18,20]基本一致。例如：潘雷[16]报道，季也蒙毕赤酵母和白地霉混菌固态发酵制得的 SFRSM 较之 RSM，ITC+OZT 含量降低 88.9%，CP 含量提高 13.39%；王刚[18]报道，戊糖片球菌和枯草芽孢杆菌混菌固态发酵制得的 SFRSM 较之 RSM，GS 含量

降低，CP、SP 和氨基酸含量提高；胡永娜[14]报道，产朊假丝酵母、枯草芽孢杆菌和粪肠球菌混菌固态发酵制得的 SFRSM 较之 RSM，CP、EE、真蛋白质、水溶性蛋白质、SP 含量显著提高，各种氨基酸含量也有提高，而 CF 含量显著降低，ITC 几乎完全降解；朱少华等[20]报道，酿酒酵母、乳酸菌和枯草芽孢杆菌混菌固态发酵制得的 SFRSM 较之 RSM，CP 和多肽含量增加，CF、总 GS、ITC、OZT 含量等降低；倪光远[15]报道，酿酒酵母、枯草芽抱杆菌和纳豆芽抱杆菌混菌固态发酵制得的 SFRSM 较之 RSM，CP 和多肽含量提高，NDF、ITC 和 OZT 含量大幅降低；邱良伟等[17]报道，植物乳杆菌和黑曲霉混菌固态发酵制得的 SFRSM 较之 RSM，CP、SP、亮氨酸（Leu）、Lys、蛋氨酸（Met）、苏氨酸（Thr）和总氨基酸含量提高，而 CF、ITC、OZT 和总 GS 含量降低。本试验中，SFRSM 的化学成分较之 RSM 有较大差异的可能原因在于：固态发酵过程中，微生物（发酵菌种）分泌的一些胞外酶（如纤维素内切酶、木聚糖酶等）作用于 RSM 的细胞壁[10,28-29]，破坏其表面结构（如形态变小、形状不规则、表面粗燥且多孔等）[12,29]，而微生物分泌的另一些胞外酶（如蛋白酶、淀粉酶、半纤维素酶、木聚糖酶、羧酸酯酶等）[10,14-15,29]进一步作用于表面结构发生变化的 RSM，使其 GS、ITC、淀粉、蛋白质、纤维素、半纤维素等被降解成其他物质（如 SP、FAA 等）；此外，微生物在其生长过程还可利用上述某些降解产物或/和外界物质（如培养基中的碳、氮源）合成一些新物质如菌体蛋白和脂质等[9-20]，这些高能、高蛋白质物质的产生，可能是 SFRSM 的 GE 和 CP 含量明显高于 RSM 的主要原因。

3.2　SFRSM 与 RSM 的营养物质全肠表观消化率及 DE 值比较

营养物质消化率和 DE 值能较真实地反映饲料营养价值，是目前家兔上评定饲料营养价值的常用指标。本试验发现，在生长肉兔上，虽然 SFRSM 的多数营养物质（除 Asp、Cys、Gly、Ile、Tyr 和 Val 外）全肠表观消化率与 RSM 无显著差异，但前者的多数营养物质（除 CF、Ash 和 Lys 外）全肠表观消化率较后者有所提高，与在猪[13,21-22]、鸡[14,19]上和体外[10,15-16,18]的类似报道不尽一致。本试验在生长肉兔上测得的 RSM 的 DE 值为 11.15 MJ/kg DM，与现有报道接近[1,30]；SFRSM 的 DE 值（14.97 MJ/kg DM）显著高于 RSM，与在猪[21-22]和鸡[14,19]上的类似报道一致，但增幅更大（+34.3%）。例如：对于生长猪，付敏等[22]报道，黑曲霉固态发酵菜籽饼的 GE、CF、ADF、NDF 全肠表观消化率，CP 全肠表观、回肠表观和标准回肠消化率，氮表观和真消化率、表观和真利用率，多数氨基酸表观和标准回肠消化率，以及

DE 值均显著高于菜籽饼；而 Shi 等[21]报道，黑曲霉固态发酵制得的 SFRSM 的 CP 和多数氨基酸表观和标准回肠消化率与 RSM 无显著差异，但有提高趋势，而 DE 和代谢能（ME）值、磷全肠表观和标准消化率极显著高于 RSM。对于育肥猪，高冬余[13]报道，乳酸菌和枯草芽孢杆菌混菌发酵（干/湿）制得的 RSM 的 DM 全肠表观消化率及 CP 表观和真消化率极显著高于 RSM。对于成年公鸡，胡永娜[14]报道，产朊假丝酵母、枯草芽孢杆菌和粪肠球菌混菌固态发酵制得的 SFRSM 的表观代谢能（AME）、真代谢能（TME）、表观代谢率、CP、CF、EE、总氨基酸、总必需氨基酸表观和真利用率显著高于 RSM，真代谢率也提高；吴东等[19]报道，发酵 RSM 的 TME、磷利用率极显著高于 RSM，而氨基酸真消化率与 RSM 无显著差异，但部分氨基酸（如 Cys、His、Leu、Lys、Phe、Thr、Tyr 和 Val）的真消化率有所提高。此外，还有报道，季也蒙毕赤酵母和白地霉混菌固态发酵[16]、戊糖片球菌和枯草芽孢杆菌混菌固态发酵[18]及酿酒酵母、枯草芽抱杆菌和纳豆芽抱杆菌混菌固态发酵[15]制得的 SFRSM 的蛋白质体外消化率均显著高于 RSM；黑曲霉固态发酵菜饼的绝大多数氨基酸体外消化率也显著高于菜籽饼[10]。本试验中，SFRSM 的多数营养物质全肠表观消化率略高于及几种氨基酸（Asp、Cys、Gly、Ile、Tyr 和 Val）全肠表观消化率和 DE 值显著高于 RSM 的原因，可能在于：1)固态发酵过程中微生物产生了一些酶，这些酶破坏了 RSM 的表面结构[10,12,28-29]，增加了消化过程中酶（家兔分泌的内源消化酶、家兔肠道微生物产生的消化酶和/或残留于 SFRSM 中的发酵菌种产生的胞外酶[10,14-15,29]）与底物的接触面积；(2)固态发酵过程中 RSM 中的不利成分（如 CF、ADF、GS、ITC 等）被降解[9-20]，同时产生了一些有益成分（如有机酸、益生菌等）[15,18]，增进了生长肉兔的机体和消化道健康。此外，关于 SFRSM 的 DM 全肠表观消化率在数值上低于 SRM 的原因，可能是由于家兔饲粮和粪便（硬便）中纤维性成分含量高，它们容积较大，粉碎后的均匀性较差，从而引起了取样误差所致。

4 结 论

综上所述，从化学组成和营养物质可消化性的角度来比较，对于生长肉兔，SFRSM 的营养价值总体高于 RSM。

参考文献：

[1] DE BLAS C,WISEMAN J.Nutrition of the rabbit[M].2nd ed.Wallingford:CABI Publishing,2010.

[2] 全国饲料工作办公室.我国饲料工业发展历经风雨方见彩虹[J].中国畜牧志,2009,45(4):1–3.

[3] LOMASCOLO A,UZAN-BOUKHRIS E,SIGOILLOT J C,et al.Rapeseed and sunflower meal:a review on biotechnology status and challenges[J].Applied Microbiology and Biotechnology,2012,95(5):1105–1114.

[4] 金虎,李坤朋,黄凤洪,等.菜籽饼粕生物转化与高值化利用技术研究进展[J].中国油料作物学报,2014,36(4):545–550.

[5] BELL J M.Nutrients and toxicants in rapeseed meal:a review[J].Journal of Animal Science,1984,58(4):996–1010.

[6] CLANDININ D R,ROBBLEE A R.Rapeseed meal in animal nutrition:Ⅱ.Nonruminant animals[J].Journal of the American Oil Chemists’ Society,1981,58(6):682–686.

[7] 李建凡,高振川,姜云侠,等.中国菜籽饼的营养成分和抗营养因子[J].畜牧兽医学报,1995,26(3):193–199.

[8] 金晶,徐志宏,魏振承,等.菜籽粕中抗营养因子及其去除方法的研究进展[J].中国油脂,2009,34(7):18–21.

[9] BAU H M,VILLAUME C,LIN C F,et al.Effect of a solid-state fermentation using *Rhizopus oligosporus* sp. T-3 on elimination of antinutritional substances and modification of biochemical constituents of defatted rapeseed meal[J].Journal of the Science of Food and Agriculture,1994,65(3):315–322.

[10] SHI C Y,HE J,YU J,et al.Solid state fermentation of rapeseed cake with *Aspergillus niger* for degrading glucosinolates and upgrading nutritional value[J].Journal of Animal Science and Biotechnology,2015,6:13.

[11] VIG A P,WALIA A.Beneficial effects of *Rhizopus oligosporus* fermentation on reduction of glucosinolates,fibre and phytic acid in rapeseed (*Brassica napus*) meal[J].Bioresource Technology,2001,78(3):309–312.

[12] 付敏,何军,余冰,等.混菌固态发酵对菜籽饼营养价值及抗营养因子含量的影响[J].动物营养学报,2013,25(7):1579–1586.

[13] 高冬余.厌氧固态发酵菜籽粕研究[D].硕士学位论文.合肥:安徽农业大学,2010.

[14] 胡永娜.微生物发酵菜籽粕营养价值的评定及其对肉仔鸡生长发育的影响[D].硕士学位论文.雅安:四川农业大学,2012.

[15] 倪光远.菜籽粕饲用生物改良技术的研究[D].硕士学位论文.武汉:华中农业大学,2009.

[16] 潘雷.不同制油工艺对菜籽饼粕营养价值的影响及其微生物脱毒的研究[D].硕士学位论文.合肥:安徽农业大学,2009.

[17] 邱良伟,顾拥建,沙文锋,等.复合微生物固态发酵菜籽粕的研究[J].安徽农业科学,2015,43(3):209–211.

[18] 王刚.微生物发酵改善菜籽粕品质的初步研究[D].硕士学位论文.无锡:江南大学,2011.

[19] 吴东,钱坤,周芬,等.普通菜籽粕与发酵菜籽粕用作鸡饲料的营养价值评定[J].安徽农业科学,2012,40(9):5263–5264.

[20] 朱少华,曲露,李小定,等.菜籽粕固态分步发酵的工艺研究[J].中国油脂,2014,39(7):37–41.

[21] SHI C,HE J,YU J,et al.Amino acid,phosphorus,and energy digestibility of *Aspergillus niger* fermented rapeseed meal fed to growing pigs[J].Journal of Animal Science,2015,93(6):2916–2925.

[22] 付敏,何军,余冰,等.发酵菜籽饼在生长猪上的营养价值评定[J].动物营养学报,2014,26(7):1916–1924.

[23] 田刚,余冰,陈代文,等.一种降低菜籽粕异硫氰酸酯含量的微生物组合固态发酵法:中国,CN103704466B[P].2014-12-17.

[24] PEREZ J M,LEBAS F,GIDENNE T,et al.European reference method for *in vivo* determination of diet digestibility in rabbits[J].World Rabbit Science,1995,13:41–43.

[25] 张丽英.饲料分析及饲料质量检测技术[M].3 版.北京:中国农业大学出版社,2007.

[26] 宋中齐,干友民,田刚,等.多花黑麦草在生长肉兔上的营养价值评定[J].草业学报,2014,23(5):352–358.

[27] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.GB/T 23736–2009 饲料用菜籽粕[S].北京:中国标准出版社,2009.

[28] KUDANGA T,MWENJE E.Extracellular cellulase production by tropical isolates of *Aureobasidium pullulans*[J].Canadian Journal of Microbiology,2005,51(9):773–776.

[29] SHI C Y,HE J,YU J,et al.Physicochemical properties analysis and secretome of *Aspergillus niger* in fermented rapeseed meal[J].PLoS One,2016,11(4):e0153230.

[30] SAUVANT D,PEREZ J M,TRAN G.Tables of composition and nutritional value of feed materials:pigs,poultry,cattle,sheep,goats,rabbits,horses,fish[M].Paris:Wageningen Academic Publishers,2004.

Comparison of Nutritional Value between Rapeseed Meal and Solid-State Fermented Rapeseed Meal for Growing Rabbits

TIAN Gang[1] WANG Lecheng[1*] YU Bing[1] CHEN Hang[1] LUO Yuheng[1] CHEN Daiwen[1] LIU Shuliang[2]

(1. *Key Laboratory for Animal Disease-Resistance Nutrition of Ministry of Education*, *Animal Nutrition Institute*, *Sichuan Agricultural University*, *Chengdu* 611130, *China*; 2. *College of Food Science*, *Sichuan Agricultural University*, *Ya'an* 625014, *China*)

Abstract: The aim of current study was to compare the nutritional value of solid-state fermented rapeseed meal (SFRSM) and rapeseed meal (RSM) for growing rabbits by digestion trial, and provide basic information for feedstuff database of rabbits. Based on measuring chemical composition of SFRSM and RSM, a total of 36 healthy growing French IRA rabbits with the age of 42 days and similar genetic background, were allocated randomly into 3 groups (12 rabbits per group) based on their body weight. Rabbits in the groups were fed one basal diet and two experimental diets （85% basal diet plus 15% RSM or SFRSM）, respectively. The rabbits were fed in the metabolic cage to complete *in vivo* digestion trial, and 1 rabbit per cage. The trial lasted for 11 days, with the first 7 days as the adaptation period and followed by 4 days as the collection period. The results showed as follows: 1) compared with RSM, the contents of crude fiber (CF), nitrogen free extract （NFE）, acid detergent fiber (ADF) and isothiocyanate (ITC) of SFRSM were significantly decreased (P<0.01), while the contents of other conventional nutrients [except

---

Author, TIAN Gang, associate professor, E-mail: tgang2008@126.com

*Contributed equally （责任编辑 菅景颖）

Neutral detergent fiber (NDF)] and small peptides were significantly increased ($P<0.05$ or $P<0.01$). The contents of amino acids of SFRSM were higher than those in RSM, with the contents of arginine, aspartate, glutamic acid, histidine, isoleucine, phenylalanine, proline and serine reached the significant level ($P<0.01$). 2) Digestible energy value of SFRSM (14.97 MJ/kg DM) was 34.3% higher than that of RSM ($P<0.01$). Compared with RSM, the apparent total tract digestibility of gross energy (GE), crude protein (CP), ADF, NDF, calcium (Ca) and phosphorus (P) of SFRSM showed a trend of improvement ($P>0.05$); the apparent total tract digestibility of amino acids of SFRSM was comprehensively increased, with the apparent total tract digestibility of aspartate, cysteine, glycine, isoleucine, tyrosine and valine reached the significant level ($P<0.05$ or $P<0.01$). The results indicate that the nutritional value of SFRSM is generally higher than that of RSM for growing rabbits.

Key words: solid-state fermented rapeseed meal; rapeseed meal; growing rabbits; chemical composition; apparent total tract digestibility